

Programujeme STM32

zdolejte jednočipy profesionálů

Ing. Vojtěch Skřivánek

2. vydání

```
RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
```

```
RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
```

```
/** Configure the main internal regulator output voltage
```

```
*/
```

```
HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG
```

```
/** Initializes the CPU, APB
```

```
*/
```

```
RCC_O
```

```
RCC_Os
```

```
RCC_Osc
```

```
RCC_OscIn
```

```
if (HAL_RCC_
```

```
{
```

```
Error_Handler()
```

```
}
```

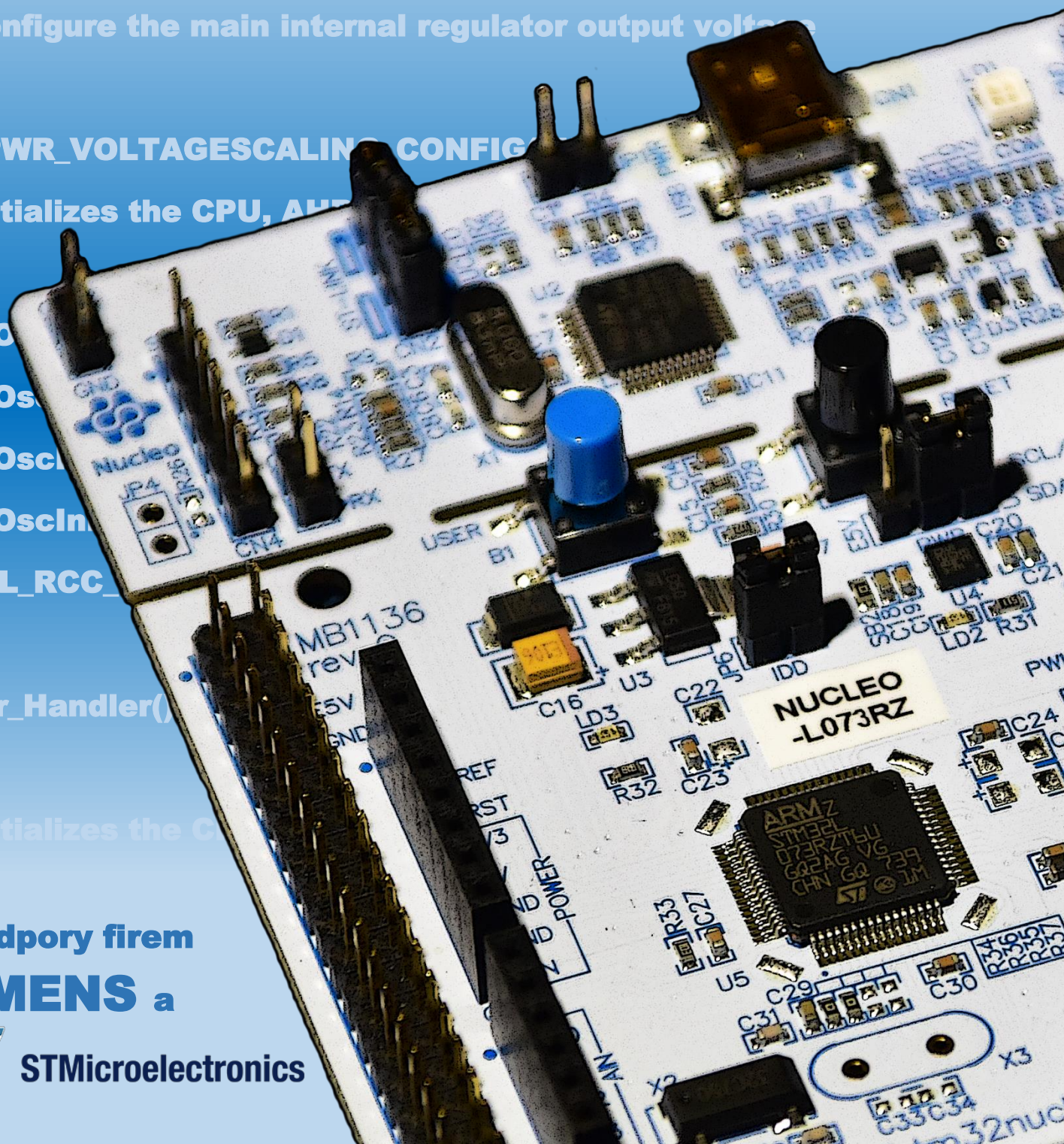
```
/** Initializes the C
```

Za podpory firem

SIEMENS a



STMicroelectronics



Programujeme STM32

zdolejte jednočipy profesionálů

Ing. Vojtěch Skřivánek

2. vydání

Poděkování

Děkuji firmám

SIEMENS

a



za podporu při psaní této knihy.

Vydání první 2022

© Ing. Vojtěch Skřivánek

© Mgr. Tomáš Zahradníček - TZ-one

ISBN: 978-80-7539-131-5 (PDF verze)

ISBN: 978-80-7539-132-2 (ePub verze)

ISBN: 978-80-7539-133-9 (mobi verze)

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Motivace knihy	1
1.2	Struktura knihy	2
1.3	Fonty textu	2
2	Vývojové nástroje	3
2.1	Vývojová deska	4
2.2	Vývojové prostředí	5
2.3	Dokumentace	5
2.4	Shrnutí	6
3	Mikrokontroler	7
4	Vstupně/výstupní piny	11
4.1	Nezbytná teorie	11
4.1.1	Frekvence výstupního pinu	12
4.1.2	Napěťové úrovně signálů	13
4.2	Praktické ukázky	14
4.2.1	Tlačítkem rozsvícená LED	14
4.2.1.1	Založení nového projektu	14
4.2.1.2	Konfigurator	15
4.2.1.3	Nastavení periferií	16
4.2.1.4	Struktura projektu	18
4.2.1.5	Tvorba programu	19
4.2.1.6	Spuštění programu	21
4.2.1.7	Ladění (debuggování) programu	23
4.3	Kvíz	26
5	Přerušení	27
5.1	Nezbytná teorie	27
5.1.1	Softwarové a hardwarové přerušení	28
5.1.2	Maskování přerušení	28
5.1.2.1	Maskování globálního přerušení	29
5.1.2.2	Maskování specifického přerušení	30
5.1.3	Příznak přerušení	30
5.1.4	Priorita přerušení	31
5.1.5	Vektor přerušení	32
5.1.6	Obsluha přerušení (ISR)	33
5.2	Praktické ukázky	34
5.2.1	Tlačítkem rozsvícená LED pomocí přerušení	34
5.2.1.1	Nastavení periferií	34

5.2.1.2	Tvorba programu	36
5.2.1.3	Zapojení	38
5.2.1.4	Rozbor programu	38
5.2.1.5	Callback funkce přerušení	41
5.3	Kvíz	42
6	UART	43
6.1	Nezbytná teorie	43
6.1.1	Protokol komunikace	43
6.1.2	UART u STM32	45
6.2	Praktické ukázky	47
6.2.1	Příjem a odeslání dat bez knihoven	47
6.2.1.1	Převodník sériové komunikace	47
6.2.1.2	Nastavení periférií	48
6.2.1.3	Tvorba programu	49
6.2.2	LED rozsvícená povel z počítače	53
6.2.2.1	Nastavení periférií	53
6.2.2.2	Tvorba programu	53
6.3	Kvíz	56
7	Časovač	57
7.1	Nezbytná teorie	58
7.1.1	Základní režimy časovače	59
7.1.1.1	Časovač	59
7.1.1.2	Output compare (OC)	60
7.1.1.3	Input Capture (IC)	60
7.1.1.4	PWM - pulzně šířková modulace	60
7.2	Praktické ukázky	62
7.2.1	Blikání pomocí časovače s přerušením	62
7.2.1.1	Nastavení hodinového signálu	62
7.2.1.2	nastavení periférií	63
7.2.1.3	Tvorba programu	65
7.2.2	Blikání pomocí OC režimu	66
7.2.2.1	Nastavení hodinového signálu	66
7.2.2.2	Nastavení periférií	66
7.2.2.3	Tvorba programu	67
7.2.3	Blikání s nastavením délky pomocí IC režimu	68
7.2.3.1	Nastavení hodinového signálu	68
7.2.3.2	Nastavení periférií	68
7.2.3.3	Tvorba programu	70
7.2.3.4	Zapojení	72
7.2.4	Nastavení jasu LED pomocí PWM režimu	73
7.2.4.1	Nastavení hodinového signálu	73
7.2.4.2	Nastavení periférií	73
7.2.4.3	Tvorba programu	74
7.2.5	Časovač spuštěný čítačem vnějších událostí	76
7.2.5.1	Nastavení hodinového signálu	76
7.2.5.2	Nastavení periférií	76
7.2.5.3	Tvorba programu	78
7.2.5.4	Zapojení	79
7.3	Kvíz	80

8	ADC	81
8.1	Nezbytná teorie	81
8.1.1	Režimy měření	82
8.1.1.1	Režim jednotlivého měření sekvence kanálů	82
8.1.1.2	Režim nepřetržitého měření sekvence kanálů	83
8.1.1.3	Režim přerušovaného měření sekvence kanálů	83
8.2	Praktické ukázky	84
8.2.1	Přerušované měření dvou kanálů	84
8.2.1.1	Nastavení periférií	84
8.2.1.2	Tvorba programu	86
8.2.1.3	Zapojení	87
8.2.2	Jednotlivé měření dvou kanálů s externím spouštěním	89
8.2.2.1	Nastavení periférií	89
8.2.2.2	Tvorba programu	90
8.2.2.3	Zapojení	92
8.3	Kvíz	93
9	DAC	95
9.1	Nezbytná teorie	95
9.2	Praktické ukázky	97
9.2.1	Nastavení jasu LED pomocí DAC	97
9.2.1.1	Nastavení periférií	97
9.2.1.2	Tvorba programu	98
9.3	Kvíz	99
10	SPI	101
10.1	Nezbytná teorie	101
10.1.1	Protokol komunikace	102
10.1.2	Režimy komunikace	103
10.1.3	SPI u STM32	104
10.2	Praktické ukázky	106
10.2.1	Jednosměrná SPI komunikace Master->Slave	106
10.2.1.1	Nastavení periférií	106
10.2.1.2	Tvorba programu	109
10.2.1.3	Zapojení	110
10.2.1.4	Rozbor programu	110
10.2.2	Jednosměrná SPI komunikace Slave->Master	112
10.2.2.1	Nastavení periférií	112
10.2.2.2	Tvorba programu	112
10.2.2.3	Zapojení	112
10.2.2.4	Rozbor programu	113
10.2.3	Obousměrná SPI komunikace Master<->Slave	114
10.2.3.1	Nastavení periférií	114
10.2.3.2	Tvorba programu	114
10.2.3.3	Zapojení	115
10.2.3.4	Rozbor programu	115
10.3	Kvíz	116

11 I2C	117
11.1 Nezbytná teorie	117
11.1.1 Protokol komunikace	118
11.1.1.1 Startovací a ukončovací signál	118
11.1.1.2 Adresový bajt	119
11.1.1.3 Potvrzovací bit	120
11.1.1.4 Zpomalení hodinového signálu	120
11.1.2 I2C u STM32	121
11.2 Praktické ukázky	122
11.2.1 Jednosměrná komunikace Master->Slave a Master<-Slave	122
11.2.1.1 Nastavení periferií	122
11.2.1.2 Tvorba programu	125
11.2.1.3 Zapojení	126
11.2.1.4 Rozbor programu	126
11.3 Kvíz	128
12 DMA	129
12.1 Nezbytná teorie	130
12.2 DMA u STM32	131
12.3 Praktické ukázky	133
12.3.1 DMA přenos z paměti do paměti	133
12.3.1.1 Nastavení periferií	133
12.3.1.2 Tvorba programu	134
12.3.1.3 Rozbor programu	135
12.3.2 DMA přenos z periferie do paměti	136
12.3.2.1 Nastavení periferií	136
12.3.2.2 Tvorba programu	139
12.3.3 DMA přenos z periferie do periferie	141
12.3.3.1 Nastavení periferií	141
12.3.3.2 Tvorba programu	143
12.3.3.3 Zapojení	144
12.4 Kvíz	145
13 Závěr	147
Příloha A Instalace standardních knihoven	153

Kapitola 1

Úvod

Milý (budoucí) programátore mikrokontrolerů, také už se Ti stalo, že ses chtěl naučit programovat nový typ mikrokontroleru, ale nevěděl jsi, jak začít? Netušil jsi, jaké vývojové platformy a nástroje jsou k dispozici, jaké jsou možnosti mikrokontroleru a jak jej nastavit a používat tak, aby dělal, co od něj chceš?

Pokud ano, jistě jsi využil internetu k hledání nepřehledného množství dokumentů, doporučení, návodů, tipů, příkladů, diskuzí a fór. V tom případě jsi také často zjistil, že velká část z nalezených informací je od uživatelské komunity, tvořena mnohdy domněnkami, fámami, bájemi. A pokud už jsi nějaké řešení našel, většinou neposkytl odpověď na Tvoji otázku.

Z toho důvodu je zde tato kniha, která Tě provede vším základním, co potřebuješ vědět o programování mikrokontrolerů STM32.

1.1 Motivace knihy

Původním důvodem k napsání této knihy bylo vytvořit studijní podklady pro studenty předmětu „Laboratoře aplikované elektroniky“ (neoficiálně Siemens Embedded Academy) na ČVUT. Tento předmět vedený zaměstnanci firmy Siemens si již několik let dává za cíl naučit studenty, jak programovat mikrokontrolery STM32. Poté, co jsem sepsal kapitoly k jednotlivým přednáškám, mi došlo, že by byla škoda tyto materiály omezit pouze k účelu výuky studentů. Jednotlivé dokumenty jsem spojil v jeden celek – knihu, kterou právě držíte v ruce.

Tato kniha je určena především programátorům mikrokontrolerů, ať už úplným nováčkům či nadšencům. Také těm, kteří již mají nějaké zkušenosti s mikrokontrolery jiných značek (PIC, AVR, MSP430) a nyní by rádi pracovali s mikrokontrolery STM32, ale nevědí, jak začít. Ovšem i profesionálové tuto knihu využijí pro rychlý přechod z jiných kontrolerů na STM32.

Avšak zřejmě největší motivací knihy je ukázat všem, že programování profesionály používaných čipů STM32 není tak obtížné, jak se může po otevření tisícistránkového referenčního manuálu zdát.

Je pravda, že již existují publikace, které o práci s STM32 pojednávají. Tyto knihy ale mají mimo předností i své nedostatky. Prakticky všechny jsou cizojazyčné, což samo o sobě může být například pro středoškolského studenta problémem. Odborné cizojazyčné knihy jsou v ČR špatně dostupné a jejich cena nebývá příznivá. Nahlédneme-li do některých z nich, zjistíme, že mnohdy ani nepokrývají všechny základní periferie kontroleru. Případně se naopak zbytečně detailně zabývají těmi, jež v praxi nejsou příliš často používány. Ukázkové příklady bývají zbytečně složité a matoucí, je k nim potřeba další hardware, nebo využívají neoficiální či zastaralé knihovní funkce.

Všem těmto nedostatkům se snaží tato kniha vyhnout. Postupně dle obtížnosti a logické návaznosti jsou popsány všechny základní periferie v jejich nejpoužívanějších režimech. Příklady jsou velmi jednoduché k pochopení, praktické, psané za použití oficiálních vývojových prostředků a knihoven, jež udržuje výrobce čipů STMicroelectronics. Ke všem příkladům stačí pouze jedna vývojová deska, není tedy nutné, mimo propojovacích drátků, dokupovat či snad sestavovat žádný dodatečný hardware.

1.2 Struktura knihy

Knihy ve svých devíti kapitolách popisuje nejdůležitější periferie, které mají téměř všechny řady mikrokontrolerů STM32.

Každá z těchto kapitol má stejnou strukturu. Po úvodním slovu, k čemu daná periferie obecně slouží, následuje podkapitola s nezbytnou teorií. Ta je určena především těm čtenářům, kteří s kontrolery ještě moc velké zkušenosti nemají. V této podkapitole se zpravidla nachází blokový diagram dané periferie a jeho popis za účelem snadného pochopení jejího řešení a funkce.

Následující podkapitola pojednává o možnostech, režimech či dalších funkcích dané periferie. Je v ní blíže popsáno, co uživateli může daná periferie nabídnout k tomu, aby snadno dosáhl kýženého výsledku. Poslední podkapitolou jsou praktické příklady, v nichž je názorně ukázáno, jak periférii nastavit do daného režimu a jak ji používat tak, aby plnila očekávanou funkci.

Na konci každé kapitoly se nachází krátký kvíz, který otestuje, zda si čtenář z dané kapitoly odnesl důležité poznatky. Kvíz je opět určený především pro nováčky.

Každá kapitola předpokládá znalosti z kapitol předchozích, a to především u příkladů. Není tedy doporučeno kapitoly přeskakovat, zvláště pak v případě, kdy čtenář nemá předchozí zkušenosti s žádnými kontrolery.

Zdrojový kód příkladů je zde ve formě obrázků. Důvody jsou dva. První je edukativní – čtenář tak nemůže text zkopírovat do vývojového prostředí, ale musí jej skutečně napsat. Tímto způsobem si člověk spíše uvědomí, co vlastně programuje. Druhým důvodem je to, že čtenář na obrázku vidí, s jakým souborem projektu a knihy pracuje jakém řádku kódu daného souboru se nacházíme. (Naši funkcionalitu totiž budeme vždy pouze doplňovat do předem vygenerovaného kódu.)

Errata a projekty příkladů z této knihy je možné najít na www.programujemekontrolery.cz.

1.3 Fonty textu

Anglické zkratky, názvy nabídek a políček vývojového prostředí a názvy registrů jsou vždy napsány tučnou kurzívou - např. ***AutoReload*** registr. Ač by bylo konzistentnější používat v knize buď pouze české, nebo anglické názvosloví, existuje-li český ekvivalent (např. názvu registru), je použit, jelikož lépe zapadne do věty, která je pak srozumitelnější.

V knize se nachází obrázky nejčastěji v podobě blokových diagramů. V nich jsou některé části zvýrazněny případně i číselně označeny. Na tato označení je v textu odkazováno tučně psaným číslem v závorce – např. (1).

Matematické výrazy či vzorce jsou vždy napsány kurzívou – např. *(počet pulzů + 1)*.

Odkazy na použité zdroje jsou uvedeny číslem v hranatých závorkách – např. [1].

Kapitola 2

Vývojové nástroje

K programování mikrokontrolerů jsou zapotřebí tři základní nástroje.

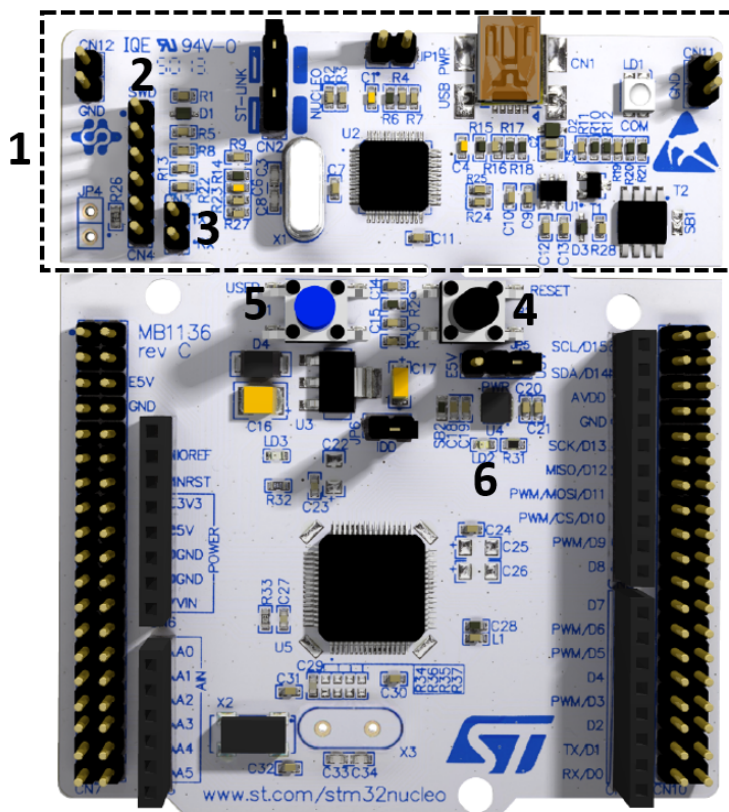
Prvním z nich je samozřejmě samotný mikrokontroler. Nejsnazším způsobem, jak mít k dispozici funkční mikrokontroler připravený k programování a používání jeho periférií, je opatřit si vývojovou desku. Firma STMicroelectronics nabízí širokou škálu cenově příznivých vývojových desek. Mezi nejznámější patří řady desek **Nucleo** a **Discovery**. Ty se od sebe liší tím, že zatímco **Nucleo** obsahuje převážně pouze mikrokontroler a konektory, **Discovery** dost často skýtá také rozličné senzory, tlačítka, LED, displeje a jiné prvky připojené přímo ke kontroleru a připravené k okamžitému použití.

Druhým potřebným nástrojem je programátor mikrokontroleru, který dokáže nahrát binární kód z PC do paměti programu čipu. Tento programátor je možné koupit samostatně, ale výhodou všech vývojových desek firmy STMicroelectronics je, že každá z nich má v sobě programátor a debugger (používaný k ladění programu) již integrovaný.

Zbývá poslední nástroj, ačkoliv jde vlastně o dva, které je však možno opět získat v jednom balíčku. Prvním je vývojové prostředí, ve kterém je možné snadno psát kód a spravovat projekt programu. Druhým je překladač zdrojového kódu, psaného v jazyce C, do strojového binárního kódu, kterému rozumí daný kontroler. Firma STMicroelectronics nabízí zdarma své vývojové prostředí **STM32CubeIDE**, ve kterém je možné napsat zdrojový kód, přeložit jej do strojového a pomocí programátoru jej nahrát do programové paměti mikrokontroleru.

2.1 Vývojová deska

Vývojová deska, která je použita na všechny příklady v této knize, je z řady desek *Nucleo* s názvem *NUCLEO-L073RZ*.



Vývojová deska NUCLEO-L073RZ [2]

Deska obsahuje, mimo mikrokontroler *STM32L073RZ*, také již zmíněný programátor a debugger sloužící k ladění programu (1). Programátor se nachází v horní části desky, kterou je možné od spodní odlomit. K programování kontrolerů mimo vývojovou desku slouží konektor CN4 v levé části (2). Horní část také obsahuje převodník z USB komunikace na *UART* (které je věnována celá kapitola této knihy), jehož vývody CN3 jsou vpravo od programovacího konektoru (3). Ani jeden z těchto konektorů není třeba používat, jelikož programátor i převodník jsou s kontrolerem spojeny můstky mezi horní a dolní částí desky.

Na dolní části desky se nachází dvě tlačítka, jedno z nich - **B2** - slouží k resetování programu mikrokontroleru (4), druhé - **B1** - je uživatelské (5), které je připojené na pin mikrokontroleru a jež bude často využíván v našich příkladech.

Kromě LED signalizujících funkci programátoru a správné napájení, je na desce umístěna také jedna uživatelská LED **LD2** (6), kterou lze pinem mikrokontroleru ovládat.

Na krajích desky pak nelze přehlédnout dva typy konektorů. Vnitřní tvořené dutinkami jsou kompatibilní se všemi rozšiřujícími deskami pro platformu Arduino. Vnější hřebínkové jsou přivedeny ke všem pinům kontroleru.

POZOR!! Ne všechny konektory jsou skutečně připojeny k pinům kontroleru. Někdy je nutné na příslušné místo na desce připájet nulový rezistor, aby došlo k propojení. Důvodem je, že daný pin je již použit například programátorem. Detaily je možné najít v dokumentaci *Nucleo* desky [2].

Kromě výše zmíněného deska ještě nabízí možnost připojení vlastního přesného oscilátoru, místo na měření proudové spotřeby a přepnutí na externí napájení. Nic z toho ale v této knize není využito.

Pokud disponujete jinou vývojovou deskou, s největší pravděpodobností budete moci většinu příkladů této knihy vyzkoušet také. Jediný velký rozdíl bude spočívat v jiných pinech, které pro jednotlivé periferie použijete.

2.2 Vývojové prostředí

Jak již bylo zmíněno, výrobce čipu poskytuje zdarma vývojové prostředí *STM32CubeIDE*, ve kterém jsou vytvořeny všechny příklady této knihy.

Toto prostředí v sobě obsahuje konfigurátor periferií čipu, programování a správu projektu, nahrání programu do mikrokontroleru a možnost jeho ladění (debugování).

S instalací vývojového prostředí se automaticky nainstaluje i ovladač programátoru, který je umístěný na Nucleo desce, a překladač ze zdrojového kódu na strojový.

STM32CubeIDE je možné po registraci na webových stránkách firmy STMicroelectronics stáhnout zcela zdarma. Nejsnazším způsobem nalezení odkazu ke stažení je zadat do internetového vyhledávače heslo „STM32CubeIDE“ a pravděpodobně hned první odkaz bude mířit na správnou stránku, kde najdete také návod na instalaci a manuál k použití.

Věřím, že není nutné popisovat instalaci vývojového prostředí, která je plně automatická a nainstaluje i všechny nutné ovladače.

2.3 Dokumentace

K práci s mikrokontrolerem a vývojovou deskou přijdou vhod čtyři dokumenty.

Prvním a nejdůležitějším je referenční manuál mikrokontroleru [1]. Tento dokument obsahuje kompletní popis kontroleru, jeho funkcí a periferií. Po jeho otevření je nutné nezaleknout se počtu stránek, jelikož ne všechny jsou stejně důležité. Veškeré kapitoly o periferiích kontroleru, mají stejnou strukturu. Po obecném úvodu a výpisu funkcí periferie následuje blokový diagram periferie, na který bude tato kniha často odkazovat. Kapitola pokračuje popisem jednotlivých funkcí a režimů periferie. I tyto informace jsou často zmíněny v této knize. Poslední částí kapitoly v referenčním manuálu jsou popisy registrů spjatých s danou periferií. Funkce některých z registrů jsou opět popsány v této knize, ale většina z nich může být spravována knihovními funkcemi. Ty jsou použity v příkladech, a proto většinou není důležité se jednotlivými registry zabývat.

Druhým dokumentem je uživatelský manuál vývojové desky *Nucleo* [2]. V něm lze mimo jiné najít, jaké piny kontroleru jsou připojeny k dutinkovým a hřebíkovým konektorům desky či na kterých pinech je připojeno uživatelské tlačítko a uživatelská LED. Také se v něm nachází informace, které piny nejsou s konektory spojeny vůbec a zda je možné to dodatečně udělat připájením nulového rezistoru na konkrétní pájící plošky na desce.

Dalším důležitým dokumentem je manuál *HAL* knihoven [3] (*Hardware Abstraction Layer*), které jsou použity v příkladech této knihy. Jde o oficiální knihovny vytvořené a udržované firmou STMicroelectronics. V tomto dokumentu se nachází výčet a popis všech knihovních funkcí k ovládání periferií mikrokontroleru. Jsou zde k nalezení vstupní a výstupní parametry funkcí a jejich význam. Obdobný popis je i v komentářích souborů implementace funkcí. Není tedy nutné mít při práci na programu tento dokument otevřený, stačí mít ve vývojovém prostředí zobrazený daný soubor.

Poslední, spíše doplňkový dokument, je katalogový list (*datasheet*) [4] rodiny mikrokontroleru. V dokumentu jsou uvedena obecná data o mikrokontroleru, jako druhy, počet a stručný popis všech periferií, velikosti pamětí, dostupná pouzdra, statické a dynamické charakteristiky (napájení a spotřeba čipu, teplotní charakteristiky, chyby převodníků...), názvy pinů pouzder, informace o napájení čipu, informace pro návrh plošného spoje a pro osazení. Tento dokument je zde uveden především kvůli důležité tabulce popisující jednotlivé piny kontroleru, která je zmíněna v kapitole o vstupně/výstupních pinech.

Všechny tyto dokumenty se hodí v momentě, kdy se chystáme pracovat s jeho periferií nebo je potřeba k mikrokontroleru připojit externí periferii.

2.4 Shrnutí

Po přečtení této kapitoly by měl mít čtenář k úspěšnému naprogramování příkladů uvedených v této knize připraveny následující nejnnutnější věci:

- vývojovou desku **NUCLEO-L073RZ**,
- **USB** kabel k připojení desky k počítači,
- počítač s nainstalovaným vývojovým prostředím **STM32CubeIDE**,
- a **několik drátků** k vzájemnému propojení vnějších konektorů vývojové desky.

S touto nezbytnou výbavou, k níž je doporučeno mít k dispozici zmíněnou dokumentaci, je možné se směle pustit do čtení následujících kapitol, které odhalují programování mikrokontrolerů STM32.